

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.036

基于图像处理的粗集料细观分布均匀性研究

林博煌¹,石立万^{2*},廖伟杰³,肖鑫²

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院 国家公路养护技术工程研究中心,湖南 长沙 410114;2.佛山科学技术学院 交通与土木建筑学院,广东 佛山 528225;3.广东省南粤交通投资建设有限公司,广东 广州 510101)

摘要:沥青混合料的均匀性对其物理力学性能具有重要影响,是沥青混合料基因组的重要构成及研究对象。为了给沥青混合料精细化设计提供参考,该文基于数字图像技术,针对3组不同级配,在不同击实条件下深入分析马歇尔试件粗集料分布的均匀特性,进而评估粗集料分布均匀性量化指标与沥青混合料宏观力学性能的关系。结果表明:马歇尔试件粗集料分布具有两端稍少而中间较多、粗集料数量最大值出现在试件高度1/3~2/3处的特征,击实次数的增加有助于增加沥青混合料分布均匀性;级配对粗集料分布均匀性具有重要影响,粗级配具有更好的均匀性,对于不同粒径集料表现为粒径越小分布均匀性越好;标准差可作为粗集料分布均匀性的定量评价指标,随着标准差数值的减小,沥青混合料具有越来越好的抗车辙性能。

关键词:道路工程;沥青混合料;数字图像处理;粗集料;均匀性

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

沥青混合料作为一种颗粒物材料,由粗细集料、沥青胶浆和空隙组成且具有分布不均匀的典型特性,是沥青混合料结构组分不均匀性的综合反映。沥青混合料的均匀性对其物理力学性能有着重要影响,直接影响到沥青路面的路用性能和使用寿命,是沥青混合料基因组的重要构成及研究对象^[1-2]。无论是沥青混合料室内试验还是现场施工过程,均匀性均是作为路面质量管控重要的技术指标^[3]。传统试验对沥青混合料均匀性的试验与检测,主要包括视觉识别、铺砂试验和核子密度仪测试等,其基本原理并非直接测试和分析沥青混合料内部的均匀性,而是通过测试表面特性、空隙率或密度等间接指标,通过计算得出沥青混合料的均匀性指标,并不能精确地对沥青混合料的内部结构进行分析。近10年来,随着计算机技术的快速发展,作为具有数字化、精细化和智能化的数字图像处理技术,在航空航天、工业

和医学等领域得到越来越广泛的应用,取得了大量研究成果。数字图像处理技术作为研究沥青混合料细观结构的基本方法之一,具有试验工作量少且快捷方便的特征,备受广大道路工作者的关注^[4-6]。对于沥青混合料均匀性的研究,有图像处理均匀性算法与仿真^[7-8]、路面摊铺离析评价^[9-10]、热再生沥青混合料均匀性^[11]、粗集料运动特征^[12]、智能压实均匀性^[13]、骨架性能^[14-15]以及均匀性影响因素等^[16],涉及沥青混合料研究的各方面,但是对于马歇尔击实过程粗集料分布均匀性还缺乏相应研究。

粗集料作为沥青混合料中的主要承载结构与结构组成部分,其空间分布状态对沥青混合料的路用性能有着直接影响。数字图像处理技术可通过算法精确提取并统计沥青混合料中粗集料颗粒的信息,为分析集料在沥青混合料中的细观分布提供简单便捷的方法。因此,本文基于数字图像技术,针对不同级配,对沥青混合料击实过程中粗集料分布均匀性进行深入分析,进而评估粗集料分布均匀性指标与沥青混合料宏观力学性能的关系,为沥青混合料精

收稿日期:2023-03-06

基金项目:广东省企业科技特派员资质项目(编号:GDKTP2020036600)

作者简介:林博煌,男,硕士研究生.E-mail:844065925@qq.com

*通信作者:石立万,男,博士,副教授.E-mail:slwan1223@163.com

细化设计提供参考。

1 沥青混合料图像处理与均匀性评价

1.1 沥青混合料图像获得方法

本文研究目的是对沥青混合料粗集料分布均匀性进行分析,首先要获取沥青混合料试件切片图像。目前,获取沥青混合料切片图像的方法主要有 CCD 数码相机拍照和 X-ray CT 扫描,但目前技术条件下 X-ray CT 扫描获得的图像相对较模糊,特别是粒径较小的集料与沥青的边界由于被沥青覆盖而难以识别,图像处理特别是粗集料分割的误差相对较大。因此,本研究在制作马歇尔试件后,沿着试件纵向获得沥青混合料切片图像。马歇尔试件切割方法和典型沥青混合料切片图像如图 1 所示。

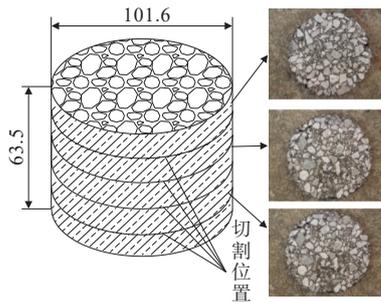


图 1 马歇尔试件切割方法(单位:mm)

1.2 图像处理与粗集料分布均匀性评价

图像处理的主要目的是将沥青混合料二值化处理,提取并精确识别研究对象便于后续分析。目前图像处理二值化方法较多,有双峰法、导数法和 OTSU 法等,均不同程度存在粒径较小集料辨识精度不足的问题。因此,本研究基于 Python 程序研发图像处理和快速评价软件,快速而精确辨识粗集料轮廓,从而实现图像的精确二值化处理。在图像二值化完成后,利用 Image-Pro Plus 6.0 软件,通过扇形扫描的方法辨识粗集料直径、面积和形心位置等体积指标,具体图像处理与粗集料辨识步骤如图 2、3 所示。

图 3 中各步骤具体如下:

步骤 1: 沥青混合料切片图像的二值化处理。主要步骤包括图像初步二值化、移除图像区域之外的纹理、移除噪声、移除 2.36 mm 以下细集料、分水岭算法分离黏连颗粒、去除图像外框等一系列步骤,最终

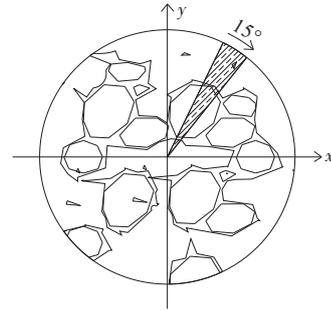


图 2 粗集料识别扇形扫描示意

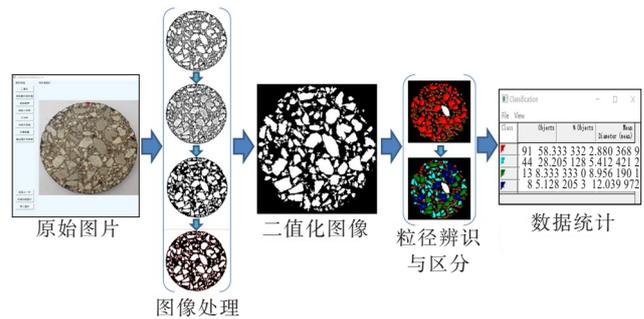


图 3 图像处理与均匀性分析方法

获得仅含大于粒径 2.36 mm 粗集料的二值化图像。

步骤 2: 对步骤 1 获得的二值化图像进行集料粒径区分与均匀性分析。通过 Image-Pro Plus 6.0 软件 Count/Size 操作自动将粗集料进行编号,设置参数以不同颜色区分各档粒径粗集料。本文分别以蓝色、绿色、青色和红色分别标识 13.2~16.0 mm、9.5~13.2 mm、4.75~9.5 mm、2.36~4.75 mm 粗集料,如图 3 所示。同时,Image-Pro Plus 6.0 软件自动输出不同粒径粗集料总数量、粗集料面积、等效直径等参数。

2 试验设计

为了对不同级配混合料中粗集料均匀性进行分析,评价沥青混合料的性能,本次试验采用 3 种不同的级配,所用集料为花岗岩,70#石油沥青,油石比为 5.0%,混合料级配如表 1 所示。根据图 1 试件切割方法,在成型马歇尔试件后进行横向切割获取沥青混合料切片。每种级配各成型 3 组马歇尔平行试件,可获得 30 张切片数据,数据是根据获取的 30 张切片图像取平均值。为研究沥青混合料粗集料均匀性特征,试件制作过程中,每种级配马歇尔击实次数分别采取双面 50 次、双面 75 次两种进行对比。各级配代表性切片如图 4 所示。

表 1 沥青混合料级配

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配 1	100	99.3	68.5	38.0	29.8	22.4	15.7	9.3	6.4	4.2
级配 2	100	99.5	75.9	40.3	31.4	23.5	16.5	9.8	6.7	4.3
级配 3	100	99.7	84.6	63.2	50.3	37.4	25.9	14.7	9.6	6.3



图 4 各级配代表性切片图像(双面击实 75 次)

3 粗集料分布均匀性量化评价

3.1 试件纵向粗集料分布均匀性

根据图 1 试件切割方法,在制作马歇尔试件后沿着试件纵向切割,获得沥青混合料切片图像。在进行图像处理,得到不同级配和不同击实方式条件

下,粗集料沿试件纵向分布特征,如图 5 所示。

根据图 5 可得出以下结论:

(1) 对于所有级配,不同粒径粗集料沿马歇尔试件纵向分布不均匀,试件两端粗集料分布稍少而中间较多,粗集料数量最大值出现在试件高度的 1/3~2/3 处。

(2) 随着粗集料粒径的减小,图像切片中粗集料数量逐渐增多,粗集料数量的波动范围也更大。不同粒径粗集料数量比例与级配通过率基本一致,误差率在 10% 以内,表明数字图像处理技术获得的粗集料数量信息基本可以反映粗集料级配分布特征。

(3) 随着击实次数由 50 次增加到 75 次,粗集料分布的波动性逐渐减少,击实次数的增加有助于增加沥青混合料分布均匀性。

(4) 根据表 1,级配 1 最粗而级配 3 最细。图 5 结果表明沥青混合料级配越细,粗集料沿试件纵向分布波动性越小,级配越粗,粗集料沿试件纵向分布波动性也会越大。

3.2 粗集料分布变异性分析

本文采用标准差和变异系数对不同级配的粗集料分布变异性进行分析和评价。对各级配在不同击实次数条件下的粗集料数量进行统计,得到粗集料数量最大

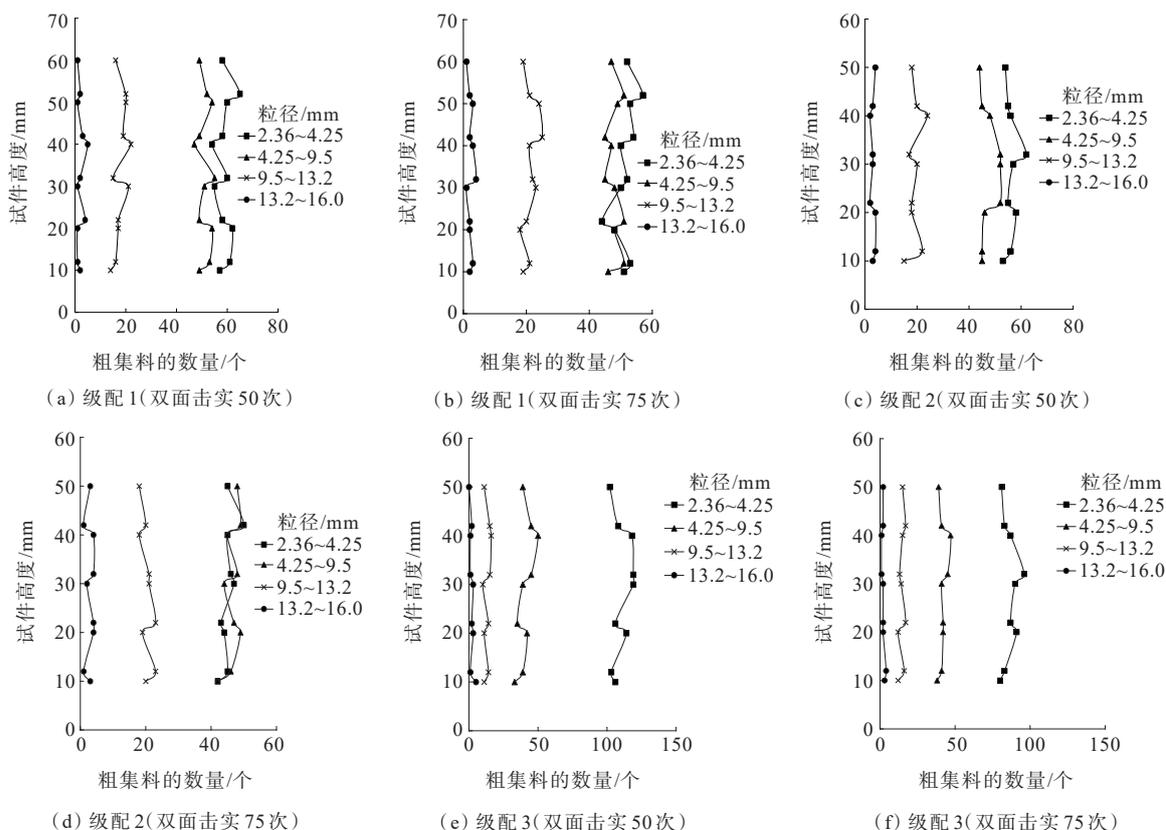


图 5 不同级配、不同击实次数下粗集料沿试件纵向分布特征

值、粗集料数量最小值、粗集料数量平均值、标准差和变异系数等统计参数,如表2所示。

表2 不同级配、不同击实次数粗集料变异性分析结果

级配类型	击实次数/次	粒径范围/ mm	粗集料数量					
			最大值/个	最小值/个	平均值/个	标准差/个	变异系数	
级配1	50	13.2~16.0	72	37	54	9.948	0.192	
		9.5~13.2	54	38	47	6.510	0.115	
		4.75~9.5	27	14	18	3.998	0.222	
	75	2.36~4.75	5	1	3	1.841	0.413	
		13.2~16.0	60	28	44	9.032	0.210	
		9.5~13.2	64	30	47	6.110	0.193	
级配2	50	4.75~9.5	26	14	20	3.922	0.207	
		2.36~4.75	6	1	3	1.617	0.472	
		13.2~16.0	73	30	57	11.393	0.204	
	75	9.5~13.2	66	39	51	7.551	0.157	
		4.75~9.5	23	12	18	3.812	0.218	
		2.36~4.75	6	0	2	1.806	0.903	
	级配3	50	13.2~16.0	55	29	48	10.404	0.214
			9.5~13.2	63	36	47	7.357	0.157
			4.75~9.5	30	15	21	3.447	0.213
		75	2.36~4.75	8	1	3	1.598	0.829
			13.2~16.0	126	87	107	13.994	0.131
			9.5~13.2	65	34	41	9.963	0.208
级配3	50	4.75~9.5	21	10	13	3.641	0.258	
		2.36~4.75	6	0	2	2.069	1.289	
	75	13.2~16.0	108	59	87	16.132	0.189	
		9.5~13.2	50	33	41	5.866	0.142	
		4.75~9.5	19	8	14	3.129	0.238	
		2.36~4.75	6	1	2	1.721	0.885	

分析表2可得以下结论:

(1) 作为颗粒材料的沥青混合料,级配对粗集料分布均匀性有着重要影响。级配越粗,沥青混合料中的粗集料分布离散性越小;级配越细,粗集料分布离散性越大。通过比较3种级配,标准差、变异系数整体上表现为级配1<级配2<级配3,表明随着级配由粗到细,粗集料分布均匀性也随着降低。

(2) 不同粒径粗集料在沥青混合料中分布均匀性也有所不同,具体表现为粗集料粒径越小,粗集料分布均匀性也会越好;粗集料粒径越大,粗集料分布均匀性也会随之变差。数据表明:对于不同级配和不同击实次数,均表现出随着粗集料粒径的增大,标准差呈逐渐增加的趋势,粗集料的离散程度也随着变大。对于变异系数,则主要表现为波动状态,与粒

径大小无明显的相关关系。

(3) 随着击实次数由50次增加到75次,各粒径集料的标准差基本呈逐渐减少的趋势,离散程度也随着减少,均匀性增大。

3.3 粗集料细观均匀性与宏观力学性能的关系

对于各级配,以马歇尔试件双面击实75次为标准,取各粒径粗集料包括2.36~4.75 mm、4.75~9.5 mm、9.5~13.2 mm和13.2~16.0 mm标准差的平均值作为沥青混合料的标准差,作为表征沥青混合料细观结构的均匀性。为了解粗集料分布细观均匀性与沥青混合料抗车辙性能之间的关系,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)^[17]规定,采用轮碾机碾压成型300 mm×300 mm×50 mm的车辙板试件,试验过程中荷载为0.7 MPa,温度

控制为 $(60 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$ 。各级配粗集料分布标准差与车辙深度和动稳定度的关系如图6所示。

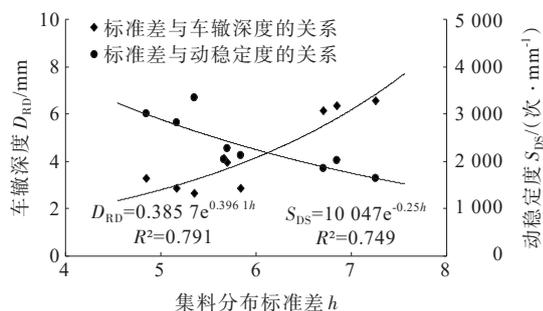


图6 粗集料分布标准差与车辙指标的关系

从图6可看出:粗集料分布标准差与车辙深度、动稳定度有相对较好的相关关系。标准差可作为粗集料分布均匀性的定量评价指标,随着标准差数值的减小,沥青混合料具有更好的均匀性,与此对应的沥青混合料具有越来越好的抗车辙性能。

4 结论

基于数字图像技术,针对3组不同级配,在不同击实条件下的马歇尔试件粗集料分布均匀性进行研究,分析粗集料分布均匀性指标与沥青混合料宏观力学性能的关系,主要结论如下:

(1) 马歇尔试件粗集料沿着纵向分布不均匀,试件两端粗集料分布稍少而中间较多,粗集料数量最大值出现在试件高度的 $1/3 \sim 2/3$ 处,击实次数的增加有助于增加沥青混合料分布均匀性。

(2) 级配对粗集料分布均匀性有重要影响。级配越粗,沥青混合料中的粗集料分布离散性越小;级配越细,粗集料分布离散性越大,均匀性也随着降低。对于不同粒径集料,具体表现为粗集料粒径越小,分布均匀性也会越好;粗集料粒径越大,分布均匀性也会随之变差。

(3) 粗集料分布标准差与车辙深度、动稳定度有相对较好的相关关系。标准差可作为粗集料分布均匀性的定量评价指标,随着标准差数值的减小,沥青混合料具有越来越好的抗车辙性能。

参考文献:

[1] 谭忆秋,吕慧杰,徐慧宁.材料基因思想在沥青路面材料领域的应用展望[J].交通运输研究,2020,6(5):1-12.

[2] 邢超,谭忆秋,张凯,等.基于材料基因组方法的沥青混合料基因特性综述及展望[J].中国公路学报,2020,33(10):76-90.

[3] 王方立,阮坤,李伟雄.基于三维探地雷达的沥青路面混合料施工均匀性评价研究[J].路基工程,2020(4):163-169.

[4] 张莹莹,刘飞,黎晓.基于数字图像技术的沥青路面变异系数相关性评价及预测[J].中外公路,2021,41(6):82-86.

[5] 孙雅珍,郭学南,程圆圆,等.细观尺度下基于非均匀性研究沥青混合料的开裂行为[J].中外公路,2018,38(5):187-192.

[6] 高凡,贺春光,王鹏章,等.数字图像处理在混凝土路面裂缝中的应用[J].中外公路,2023,43(1):44-51.

[7] 赵毅,杨旋,郝增恒,等.沥青混合料均匀性数字图像评价方法研究进展[J].材料导报,2020,34(23):23088-23099.

[8] MA T, WANG H, ZHANG D Y, et al. Heterogeneity effect of mechanical property on creep behavior of asphalt mixture based on micromechanical modeling and virtual creep test [J]. Mechanics of Materials, 2017, 104: 49-59.

[9] 熊学堂,张肖宁,虞将苗,等.沥青路面施工质量的均匀性评价方法[J].科学技术与工程,2017,17(33):166-172.

[10] 曾晟,梁乃兴,薛轲,等.摊铺沥青路面集料均匀性数字图像评价方法[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(9):144-148.

[11] 李雪连,崔之靖,吕新潮,等.就地热再生沥青混合料均匀性的细观评价指标[J].中国公路学报,2020,33(10):254-264.

[12] SHI L W, WANG D Y, JIN C N, et al. Measurement of coarse aggregates movement characteristics within asphalt mixture using digital image processing methods [J]. Measurement, 2020, 163: 107948.

[13] 吴春颖,张丽丽,张鹏.利用智能碾压系统评价沥青路面碾压均匀性方法研究[J].中外公路,2017,37(4):42-45.

[14] 石立万,王端宜.基于数字图像处理的沥青混合料主骨架评价标准[J].中国公路学报,2017,30(5):52-58,73.

[15] WILLS J, CARO S, BRAHAM A. Influence of material heterogeneity in the fracture of asphalt mixtures [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(7): 747-760.

[16] SHI L W, WANG D Y, XIAO X, et al. Meso-structural characteristics of asphalt mixture main skeleton based on meso-scale analysis [J]. Construction and Building Materials, 2020, 232: 117263.

[17] 交通运输部交通科学研究所.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.